

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 32

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Μελετήσαμε διάφορες πτυχές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Μάθαμε πως, όταν τα πεδία αυτά δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο, όπως το ηλεκτρικό πεδίο που παράγει ακίνητο φορτίο ή το μαγνητικό πεδίο ενός σταθερού ρεύματος, μπορούμε να τα αναλύσουμε ανεξάρτητα χωρίς να θεωρήσουμε αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Όμως, όταν τα πεδία αλλάζουν με τον χρόνο, δεν είναι πλέον ανεξάρτητα. Ο νόμος του Faraday (Μάικλ Φαραντέι, Άγγλος επιστήμονας, 1791-1867) μας λέει ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δρα ως πηγή ηλεκτρικού πεδίου, όπως αποδεικνύουν οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις σε αυτεπαγωγές και μετασχηματιστές. Ο νόμος του Ampère (Ανδρέας Μάριος Αμπέρ, Γάλλος φυσικός, 1775-1836), συμπεριλαμβάνοντας το ρεύμα μετατόπισης που ανακάλυψε ο Μάξγουελ δείχνει ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δρα ως πηγή μαγνητικού πεδίου.

Ο Ηλεκτρισμός και ο Μαγνητισμός ενοποιήθηκαν στον **Ηλεκτρομαγνητισμό**, όπως περιγράφεται από τις εξισώσεις του Maxwell. Οι εξισώσεις αυτές δείχνουν ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δρα ως πηγή ηλεκτρικού πεδίου και ότι ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι πηγή μαγνητικού πεδίου. Τέτοια πεδία E και B μπορούν να υποστηρίξουν το ένα το άλλο δημιουργώντας ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται στον χώρο. Το ορατό φως, που εκπέμπεται από το πυρακτωμένο νήμα ενός λαμπτήρα, είναι ένα παράδειγμα ηλεκτρομαγνητικού κύματος· άλλα είδη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παράγονται από σταθμούς τηλεόρασης και ραδιοφώνου, από μηχανήματα ακτίνων Χ και από ραδιενεργούς πυρήνες.

Θα χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις του Maxwell ως τη θεωρητική βάση για την κατανόηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ MAXWELL ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{περικλ.}}}{\epsilon_0} \quad (\text{νόμος του Gauss}) \quad (29.18)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (\text{νόμος του Gauss για τον Μαγνητισμό}) \quad (29.19)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{νόμος του Faraday}) \quad (29.20)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(i_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right)_{\text{περικλ.}} \quad (\text{νόμος του Ampère}) \quad (29.21)$$

Αυτές οι εξισώσεις ισχύουν για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο κενό. Παρουσία κάποιου υλικού, η ηλεκτρική σταθερά ϵ_0 και η μαγνητική σταθερά μ_0 αντικαθίστανται από την επιτρεπτότητα ϵ και τη διαπερατότητα μ του υλικού.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell, ένα ακίνητο σημειακό φορτίο δημιουργεί ένα στατικό πεδίο $\mathbf{E}$ και καθόλου πεδίο $\mathbf{B}$, ενώ ένα σημειακό φορτίο κινούμενο με σταθερή ή μεταβαλλόμενη ταχύτητα δημιουργεί αμφότερα τα πεδία $\mathbf{E}$ και $\mathbf{B}$.

Μπορούμε ακόμα να χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις του Maxwell για να αποδείξουμε ότι, για να δημιουργήσει ένα σημειακό φορτίο ηλεκτρομαγνητικά κύματα, θα πρέπει να **επιταχυνθεί**. Μάλιστα, **κάθε** φορά που εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, η πηγή είναι επιταχυνόμενα φορτία.

32.1 Ο Σκοτσέζος φυσικός Τζέιμς Κλαρκ Μάξγουελ (1831-1879) ήταν ο πρώτος που πραγματικά κατανόησε τη θεμελιώδη φύση του φωτός. Συνέβαλε επίσης σημαντικά στη Θερμοδυναμική, την Οπτική, την Αστρονομία και την έγχρωμη φωτογραφία. Ο Albert Einstein [Άλμπερτ Αϊνστάιν, διάσημος φυσικός και φιλόσοφος (1879-1955), βραβείο Νομπέλ 1921] περιέγραψε τα επιτεύγματα του Μάξγουελ ως «τα πιο βαθιά και καρποφόρα που έχει γνωρίσει η Φυσική από την εποχή του Νεύτωνα».

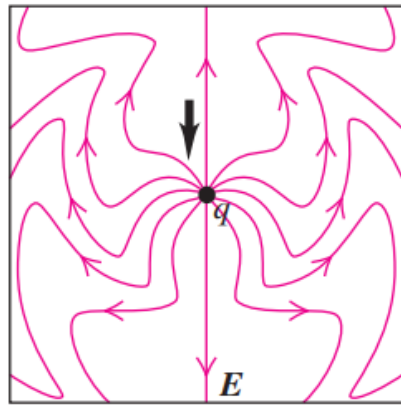


Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

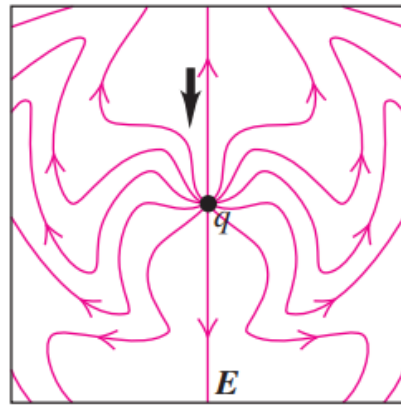
Ένας τρόπος για να κάνουμε ένα σημειακό φορτίο να εκπέμψει ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι να το θέσουμε σε απλή αρμονική κίνηση, κατά την οποία επιταχύνεται σχεδόν συνεχώς (εξαιρούνται οι στιγμές που το φορτίο περνάει από τη θέση ισορροπίας του). Το Σχ. 32.3 δείχνει κάποιες από τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, που παράγεται από ένα τέτοιο ταλαντούμενο σημειακό φορτίο.

32.3 Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου σημειακού φορτίου, που εκτελεί απλή αρμονική κίνηση, σε πέντε χρονικές στιγμές στη διάρκεια μιας περιόδου T . Η τροχιά του φορτίου είναι στο επίπεδο του σχήματος. Για $t = 0$, το ηλεκτρικό φορτίο βρίσκεται στη θέση μέγιστης μετατόπισης προς τα πάνω. Το βέλος δείχνει έναν «κόμβο» στις γραμμές του E καθώς διαδίδεται προς τα έξω από το φορτίο. Το μαγνητικό πεδίο (δεν απεικονίζεται) περιλαμβάνει κύκλους, που βρίσκονται σε επίπεδα κάθετα σε αυτές τις εικόνες και έχουν τα κέντρα τους πάνω στον άξονα της ταλάντωσης.

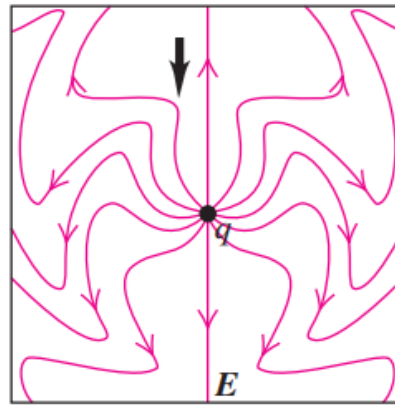
(a) $t = 0$



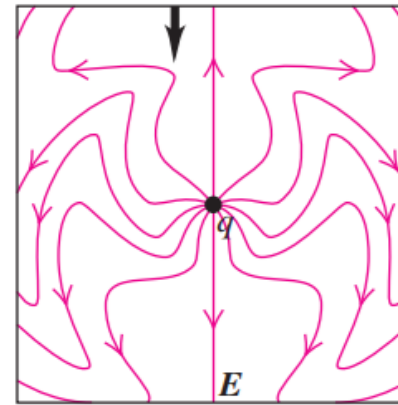
(b) $t = T/4$



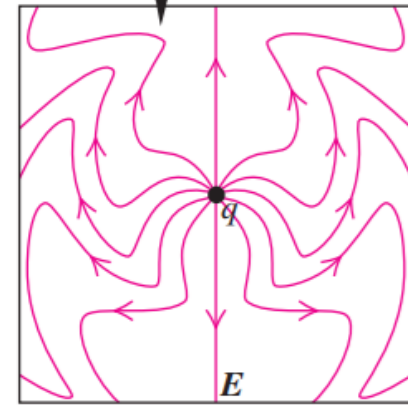
(c) $t = T/2$



(d) $t = 3T/4$



(e) $t = T$

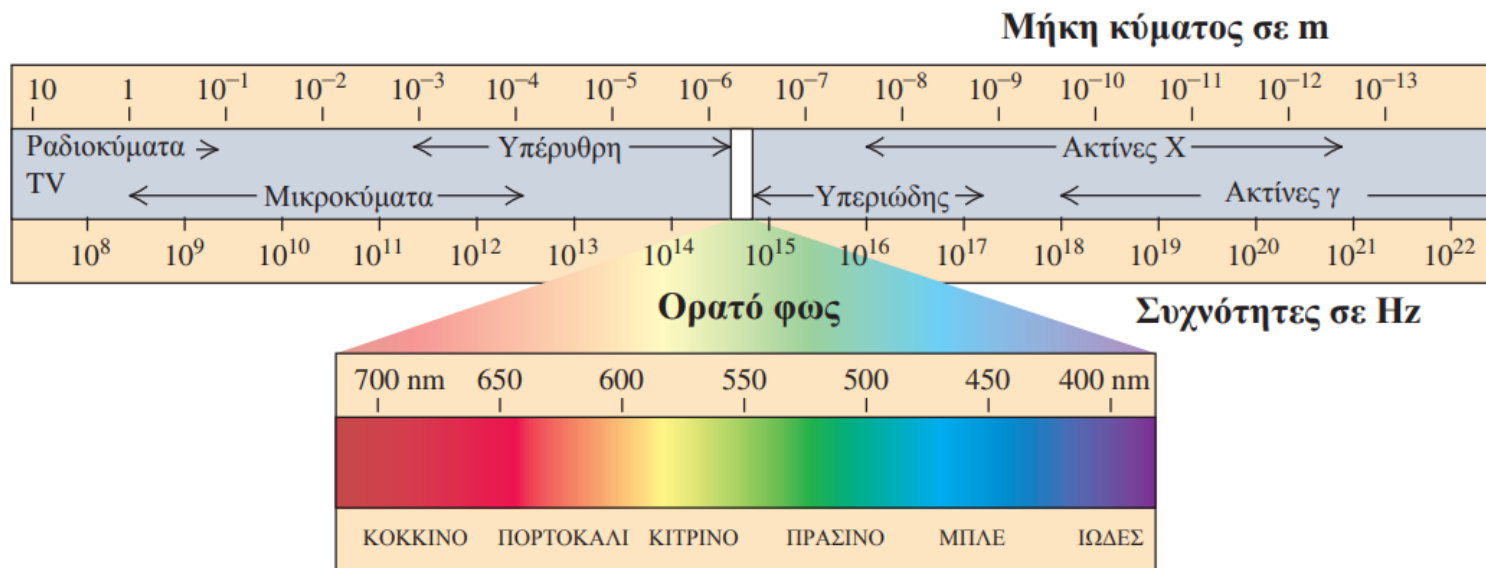


Επειδή οι ηλεκτρικές και μαγνητικές διαταραχές διαδίδονται ή ακτινοβολούνται μακριά από την πηγή, ο όρος **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** χρησιμοποιείται εναλλακτικά με τον όρο «ηλεκτρομαγνητικά κύματα». Ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μακροσκοπικά μήκη κύματος παράχθηκαν για πρώτη φορά στο εργαστήριο το 1887 από τον Γερμανό φυσικό Heinrich Hertz (Χάινριχ Χερτς, 1857-1894. Από αυτόν πήρε το όνομά της η μονάδα συχνότητας στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων SI). Ως πηγή κυμάτων χρησιμοποίησε ταλαντούμενα φορτία σε κυκλώματα $L-C$ (δείτε Εδ. 30.5)· ανίχνευσε τα εκπεμπόμενα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα** με άλλα κυκλώματα ρυθμισμένα στην ίδια συχνότητα. Υπολόγισε την ταχύτητα των κυμάτων και απέδειξε ότι ήταν ίση με την ταχύτητα του φωτός· αυτό ήταν ευθεία επιβεβαίωση της θεωρητικής πρόβλεψης του Μάξγουελ.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα I

Το **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα** περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα όλων των συχνοτήτων και μηκών κύματος. Το Σχ. 32.4 δείχνει κατά προσέγγιση τις περιοχές μηκών κύματος και συχνοτήτων για το τμήμα του φάσματος που συναντάμε πιο συχνά. Παρά τις τεράστιες διαφορές στις χρήσεις τους και στους τρόπους παραγωγής τους, όλα αυτά είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με την ίδια ταχύτητα διάδοσης (στο κενό) $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορεί να διαφέρουν ως προς τη συχνότητα f και το μήκος κύματος λ , αλλά η σχέση $c = \lambda f$ στο κενό ισχύει για όλα.

32.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Οι συχνότητες και τα μήκη κύματος που υπάρχουν στη φύση εκτείνονται σε τόσο μεγάλο εύρος που κάνει αναγκαία τη χρήση λογαριθμικής κλίμακας για να δείξουμε όλες τις ενδιαφέρουσες ζώνες. Τα όρια των ζωνών είναι κάπως αυθαίρετα.



Μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα του φάσματος είναι αντιληπτό σε εμάς μέσω της αίσθησης της όρασης. Ονομάζουμε αυτό το τμήμα **ορατό φως**. Τα μήκη κύματός του εκτείνονται από περίπου 380 nm μέχρι 750 nm ($380 \times 10^{-9}\text{ m}$ μέχρι $750 \times 10^{-9}\text{ m}$), με αντίστοιχες συχνότητες από περίπου 790 THz μέχρι 400 THz ($7,9 \times 10^{14}\text{ Hz}$ μέχρι $4,0 \times 10^{14}\text{ Hz}$). Διαφορετικές περιοχές του ορατού φάσματος προκαλούν στον άνθρωπο την αίσθηση διαφορετικών χρωμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 32.1 Μήκη Κύματος του Ορατού Φάσματος

(380-450) nm	Ιώδες
(450-495) nm	Κυανό
(495-570) nm	Πράσινο
(570-590) nm	Κίτρινο
(590-620) nm	Πορτοκαλόχρωμο
(620-750) nm	Ερυθρό

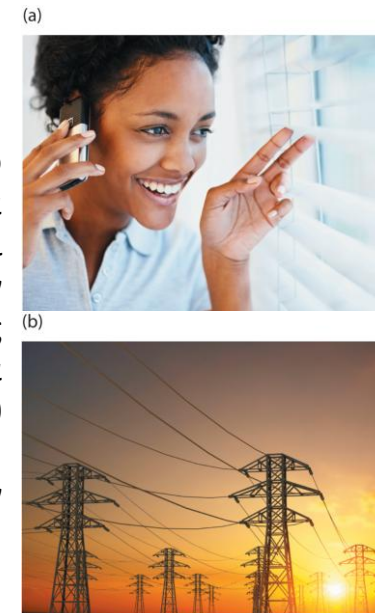
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα II

BIO Εφαρμογή Υπεριώδης Όραση Πολλά έντομα και πουλιά βλέπουν και υπεριώδη μήκη κύματος, που δεν είναι ορατά στον άνθρωπο. Για παράδειγμα, η αριστερή φωτογραφία δείχνει πώς φαίνονται σε εμάς οι κίτρινες μαργαρίτες (του γένους Rudbeckia). Η ψευδέγχρωμη φωτογραφία παρακάτω, που τραβήχτηκε με μια κάμερα ευαίσθητη στην υπεριώδη ακτινοβολία, δείχνει πώς τα ίδια αυτά λουλούδια φαίνονται στις μέλισσες που τα γονιμοποιούν. Σημειώστε την έντονη κεντρική κηλίδα που είναι αόρατη στον άνθρωπο. Έτσι και πολλά πουλιά με υπεριώδη όραση –ανάμεσά τους πολλά είδη παπαγάλων και παγωνιών – φέρουν στο σώμα τους ζωηρόχρωμους σχηματισμούς στο υπεριώδες, που εμφανίζονται ακόμη πιο έντονοι στα δικά τους μάτια απ' ό,τι φαίνονται στα δικά μας.



Οι αόρατες μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι λιγότερο σημαντικές από το ορατό φως. Παραδείγματος χάρη, το σύστημα της παγκόσμιας επικοινωνίας εξαρτάται από τα ραδιοκύματα· οι ραδιοφωνικές εκπομπές AM χρησιμοποιούν συχνότητες από $5,4 \times 10^5$ Hz μέχρι $1,6 \times 10^6$ Hz και οι εκπομπές FM γίνονται σε συχνότητες από $8,8 \times 10^7$ Hz μέχρι $1,08 \times 10^8$ Hz. Τα μικροκύματα επίσης χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες (για παράδειγμα, από τα κινητά τηλέφωνα και τα ασύρματα δίκτυα) και στα ραντάρ παρακολούθησης του καιρού (σε συχνότητες κοντά στα 3×10^9 Hz). Πολλές κάμερες διαθέτουν μια συσκευή που εκπέμπει δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας· από την ανάλυση των ιδιοτήτων της ανακλώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας από το αντικείμενο, η κάμερα προσδιορίζει την απόστασή της από αυτό και ρυθμίζει αυτόματα την εστίαση. Οι ακτίνες X έχουν την ικανότητα να διαπερνούν τη σάρκα και αυτό τις κάνει ανεκτίμητες στην Ιατρική και την Οδοντιατρική. Οι ακτίνες γ, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με το μικρότερο μήκος κύματος χρησιμοποιούνται στην Ιατρική για την καταστροφή καρκινικών κυττάρων.

32.2 (a) Κάθε κινητό τηλέφωνο εκπέμπει σήματα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που παράγονται από επιταχυνόμενα φορτία. (b) Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας φέρουν ένα ισχυρό εναλλασσόμενο ρεύμα, που σημαίνει ότι μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου επιταχύνεται μπρος πίσω και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Αυτά τα κύματα μπορούν να παράγουν έναν βόμβο από το ραδιόφωνο του αυτοκινήτου σας όταν οδηγείτε κοντά στις γραμμές. Στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για ηλεκτρομαγνητικά κύματα (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία). Σε αυτήν τη χαμηλή συχνότητα (50 Hz ή 60 Hz) και τόσο κοντά στις γραμμές μεταφοράς, η ακτινοβολία είναι ασήμαντη· κυριαρχούν ισχυρά εναλλασσόμενα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία που δεν εξαρτάται το ένα από το άλλο με τον τρόπο που συμβαίνει στην περίπτωση της ακτινοβολίας.



Βασικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ένα κύμα, στο οποίο σε κάθε χρονική στιγμή τα πεδία είναι ομοιόμορφα πάνω σε κάθε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης, ονομάζεται **επίπεδο κύμα**. Με τις εξισώσεις του Μάξγουελ αποδεικνύεται ότι:

- Το κύμα είναι **εγκάρσιο**: τα E και B είναι και τα δύο κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία είναι επίσης κάθετα μεταξύ τους. Η κατεύθυνση διάδοσης είναι η κατεύθυνση του διανυσματικού γινομένου $E \times B$ (Σχ. 32.9).
- Ο λόγος των μέτρων των πεδίων E και B είναι συγκεκριμένος: $E = cB$.
- Το κύμα διαδίδεται στο κενό με συγκεκριμένη και σταθερή ταχύτητα.

Σε αντίθεση με τα μηχανικά κύματα, τα οποία χρειάζονται τα σωματίδια κάποιου μέσου, όπως ο αέρας, για να μεταδώσουν το κύμα, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν απαιτούν κανένα μέσο.

$$\text{Ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο κενό:} \quad B = \epsilon_0 \mu_0 c E \quad (32.8)$$

Μέτρο μαγνητικού πεδίου B Μέτρο ηλεκτρικού πεδίου E
Ηλεκτρική σταθερά ϵ_0 Μαγνητική σταθερά μ_0 Ταχύτητα φωτός στο κενό c

$$\text{Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό} \quad c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (32.9)$$

Ηλεκτρική σταθερά ϵ_0 Μαγνητική σταθερά μ_0

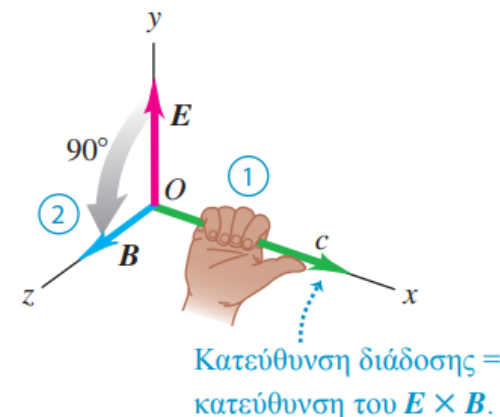
Προσεγγιστικά
$$c = \frac{1}{\sqrt{(8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2)(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)}} = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Η ταχύτητα του φωτός έχει οριστεί να είναι ακριβώς 299 792 458 m/s

32.9 Ο κανόνας της δεξιάς χειρός για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συσχετίζει τις κατευθύνσεις των E και B με την κατεύθυνση διάδοσης.

Ο κανόνας της δεξιάς χειρός για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα:

- 1 Τοποθετήστε τον αντίχειρα του δεξιού σας χεριού να δείχνει στην κατεύθυνση διάδοσης.
- 2 Φανταστείτε ότι περιστρέφετε το πεδίο E κατά 90° στην κατεύθυνση των δαχτύλων σας. Αυτή είναι η κατεύθυνση του πεδίου B .



Κυματική εξίσωση επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό

Κατά τη συζήτηση των μηχανικών κυμάτων, δείξαμε ότι μια συνάρτηση $y(x, t)$ που παριστάνει τη μετατόπιση τυχόντος σημείου σε ένα μηχανικό κύμα, το οποίο οδεύει κατά μήκος του άξονα x , πρέπει να ικανοποιεί μια διαφορική εξίσωση, Εξ. (15.12):

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (32.10)$$

Αυτή η εξίσωση ονομάζεται **κυματική εξίσωση** και το v είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Για να αποδείξουμε την αντίστοιχη εξίσωση για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, θεωρούμε πάλι ένα επίπεδο κύμα. Δηλαδή υποθέτουμε ότι σε κάθε χρονική στιγμή τα E_y και B_z είναι ομοιόμορφα πάνω σε κάθε επίπεδο κάθετο στον άξονα x , την κατεύθυνση διάδοσης. Αλλά τώρα επιτρέπουμε στα E_y και B_z να μεταβάλλονται συνεχώς κατά μήκος του άξονα x · τότε και τα δύο αυτά είναι συναρτήσεις των x και t . Με την εφαρμογή του νόμου του Faraday και του νόμου του Ampere αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E_y(x, t)}{\partial t^2} \quad \text{(Η εξίσωση των ηλεκτρο-} \quad (32.15)$$

γνητικών κυμάτων στο κενό)

Αυτή η εξίσωση έχει την ίδια μορφή με τη γενική κυματική εξίσωση, Εξ. (32.10). Εφόσον το ηλεκτρικό πεδίο E_y πρέπει να ικανοποιεί αυτήν την εξίσωση, συμπεριφέρεται ως κύμα του οποίου η μορφή ταξιδεύει στον χώρο με συγκεκριμένη ταχύτητα. Επιπλέον, η σύγκριση των Εξ. (32.15) και (32.10) δείχνει ότι η ταχύτητα v δίνεται από την έκφραση

$$\frac{1}{v^2} = \epsilon_0 \mu_0 \quad \text{ή} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

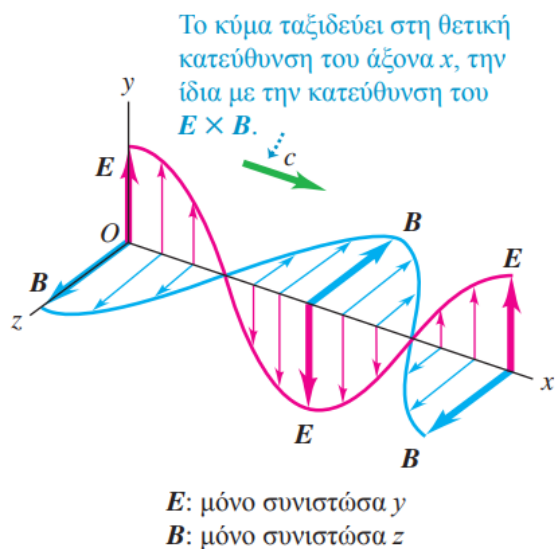
που συμφωνεί με την Εξ. (32.9) για την ταχύτητα c των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Παρόμοια κυματική εξίσωση με την 32.15 αποδεικνύεται για την κάθετη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου, B_y

ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ I

Σε ένα ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τα E και B σε κάθε σημείο στον χώρο είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου και σε κάθε χρονική στιγμή η **χωρική** μεταβολή είναι επίσης ημιτονοειδής. Κάποια ημιτονοειδή ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι **επίπεδα κύματα**, δηλαδή, σε κάθε χρονική στιγμή τα πεδία είναι ομοιόμορφα πάνω σε κάθε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης. Η όλη κυματική μορφή ταξιδεύει στην κατεύθυνση διάδοσης με ταχύτητα c . Οι κατευθύνσεις των E και B είναι κάθετες στην κατεύθυνση διάδοσης (και μεταξύ τους), οπότε το κύμα είναι **εγκάρσιο**.

32.13 Αναπαράσταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ως συναρτήσεις του x για ένα γραμμικά πολωμένο ημιτονοειδές επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Απεικονίζεται ένα μήκος κύματος τη χρονική στιγμή $t = 0$. Τα πεδία σχεδιάζονται σε μερικά μόνο σημεία κατά μήκος του άξονα x .



Έστω $E_y(x, t)$ και $B_z(x, t)$ οι στιγμιαίες τιμές της συνιστώσας y του E και της συνιστώσας z του B , αντίστοιχα, στο Σχ. 32.13, και έστω ότι $E_{\max}$ και $B_{\max}$ είναι οι μέγιστες τιμές, ή πλάτη, αυτών των πεδίων. Τότε, οι κυματοσυναρτήσεις για το κύμα είναι

$$E_y(x, t) = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad B_z(x, t) = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (32.16)$$

Μπορούμε επίσης να γράψουμε τις κυματοσυναρτήσεις σε διανυσματική μορφή:

Ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό επίπεδο κύμα, διαδιδόμενο στην κατεύθυνση $+x$:

Ηλεκτρικό πεδίο

$$E(x, t) = jE_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

Μαγνητικό πεδίο

$$B(x, t) = kB_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

Πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου

Κυματαριθμός

Γωνιακή συχνότητα

Πλάτος του μαγνητικού πεδίου

(32.17)

Ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο κενό:

Πλάτος ηλεκτρικού πεδίου

$$E_{\max} = cB_{\max}$$

Πλάτος μαγνητικού πεδίου

Ταχύτητα φωτός στο κενό

(32.18)

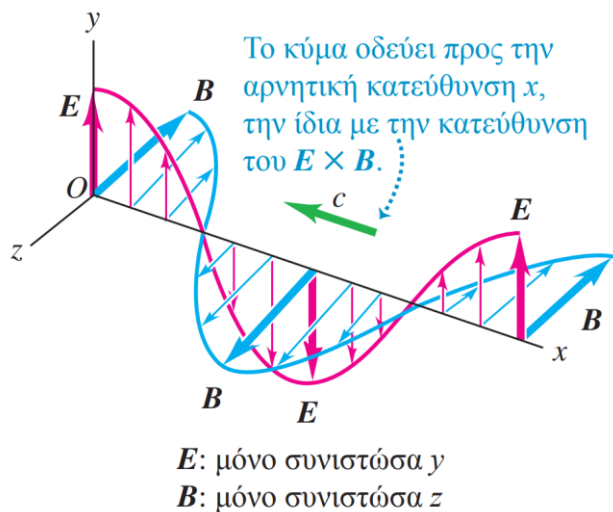
ΠΡΟΣΟΧΗ Σε ένα **επίπεδο κύμα** E και B υπάρχουν παντού Το Σχ. 32.13 δείχνει τα E και B μόνο σε σημεία πάνω στον άξονα x . Στην πραγματικότητα, σε ένα ημιτονοειδές επίπεδο κύμα υπάρχουν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε **όλα** τα σημεία του χώρου. Φανταστείτε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα x (δηλαδή παράλληλο στο επίπεδο yz) σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο και κάποια χρονική στιγμή· τα πεδία έχουν τις ίδιες τιμές σε όλα τα σημεία αυτού του επιπέδου. Οι τιμές είναι διαφορετικές σε διαφορετικά επίπεδα. |

ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ II

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό φορτίο, και που δείχνει το Σχ. 32.3 (διαφάνεια 4), είναι παράδειγμα ημιτονοειδών κυμάτων, που δεν είναι επίπεδα. Αν όμως περιορίσουμε τις παρατηρήσεις μας σε μια μικρή περιοχή του χώρου και σε αρκετά μεγάλη απόσταση από την πηγή, τότε ακόμα και αυτά τα κύματα προσεγγίζονται καλά από επίπεδα κύματα Σχ. 32.12.

Το Σχ. 32.14 δείχνει τα πεδία $\mathbf{E}$ και $\mathbf{B}$ σε ένα κύμα, που οδεύει στην αρνητική κατεύθυνση x . Στα σημεία όπου το $\mathbf{E}$ είναι στη θετική κατεύθυνση y , το $\mathbf{B}$ είναι στην αρνητική κατεύθυνση z · εκεί όπου το $\mathbf{E}$ είναι στην αρνητική κατεύθυνση y , το $\mathbf{B}$ είναι στη θετική κατεύθυνση z . Όπως και στα κύματα που οδεύουν προς την κατεύθυνση $+x$, σε κάθε σημείο οι ταλαντώσεις των πεδίων $\mathbf{E}$ και $\mathbf{B}$ του κύματος είναι σε φάση και το διανυσματικό γινόμενο $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ δείχνει στην κατεύθυνση διάδοσης. Οι κυματοσυναρτήσεις γι' αυτό το κύμα είναι

$$\begin{aligned} E(x, t) &= jE_{\max} \cos(kx + \omega t) \\ B(x, t) &= -kB_{\max} \cos(kx + \omega t) \end{aligned} \quad (32.19)$$

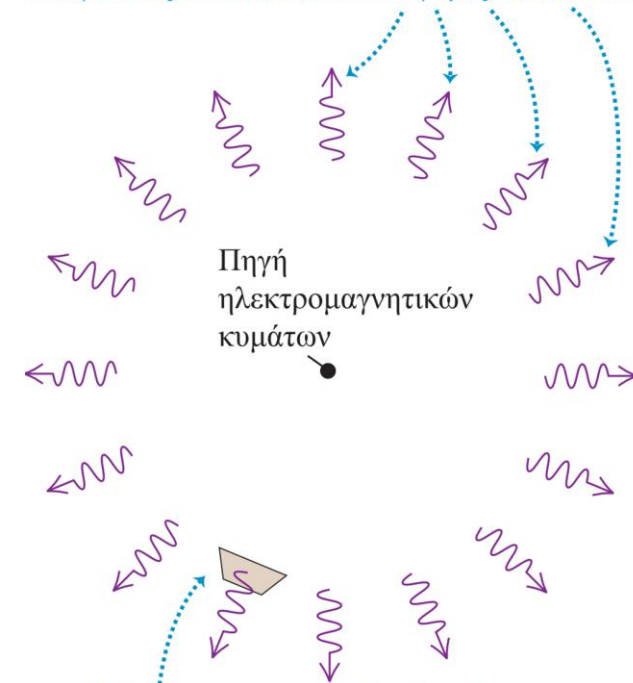


32.14 Απεικόνιση ενός μήκους κύματος γραμμικά πολωμένου ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος, που οδεύει προς την αρνητική κατεύθυνση x για $t = 0$. Τα πεδία σχεδιάζονται μόνο σε σημεία κατά μήκος του άξονα x . (Συγκρίνετε με το Σχ. 32.13.)

(ημιτονοειδές επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται στην κατεύθυνση $-x$)

Σχ. 32.12

Κύματα που περνάνε διαμέσου μιας μεγάλης επιφάνειας διαδίδονται σε διάφορες κατευθύνσεις...



... αλλά κύματα που περνάνε διαμέσου μιας μικρής επιφάνειας διαδίδονται σχεδόν στην ίδια κατεύθυνση, οπότε μπορούμε να τα χειριστούμε ως επίπεδα.

Τα ημιτονοειδή κύματα που απεικονίζονται και στα δύο Σχ. 32.13 και 32.14 είναι γραμμικά πολωμένα στη διεύθυνση y · το πεδίο $\mathbf{E}$ είναι πάντα παράλληλο προς τον άξονα y .

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην ύλη

Η ταχύτητα του κύματος σε ένα διηλεκτρικό δεν είναι η ίδια με αυτή στο κενό και τη συμβολίζουμε με v αντί για c .

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{KK_m}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{KK_m}} \quad (32.21)$$

Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε διηλεκτρικό
Διαπερατότητα
Ταχύτητα φωτός στο κενό
Επιτρεπτότητα
Σχετική επιτρεπτότητα
Σχετική διαπερατότητα
Ηλεκτρική σταθερά
Μαγνητική σταθερά

$$E = vB \quad \text{και} \quad B = \epsilon\mu vE \quad (32.20)$$

Στα περισσότερα διηλεκτρικά η σχετική διαπερατότητα K_m είναι σχεδόν ίση με τη μονάδα (εξαιρούνται τα μονωτικά σιδηρομαγνητικά υλικά). Για $K_m \approx 1$, $v = c/\sqrt{K}$. Επειδή η K είναι πάντα μεγαλύτερη από τη μονάδα, η ταχύτητα v των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μη μαγνητικά διηλεκτρικά είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητα c στο κενό κατά τον παράγον $1/\sqrt{K}$ (Σχ. 32.16). Ο λόγος της ταχύτητας c στο κενό προς την ταχύτητα v σε ένα υλικό είναι γνωστός στην Οπτική με τον όρο **δείκτης διάθλασης** n του υλικού. Όταν $K_m \approx 1$

$$\frac{c}{v} = n = \sqrt{KK_m} \approx \sqrt{K} \quad (32.22)$$

Όταν τα πεδία ταλαντώνονται γρήγορα, συνήθως δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για τον αναπροσανατολισμό των ηλεκτρικών διπόλων που λαμβάνει χώρα σε σταθερά πεδία. Οι τιμές του K με γρήγορα μεταβαλλόμενα πεδία είναι συνήθως πολύ **μικρότερες** από τις τιμές στον πίνακα. Για παράδειγμα, το K του νερού είναι 80,4 για σταθερά πεδία, αλλά μόλις 1,8 στις συχνότητες του ορατού φωτός. Έτσι, η σχετική επιτρεπτότητα (διηλεκτρική σταθερά) K είναι στην πραγματικότητα συνάρτηση της συχνότητας (λέγεται **διηλεκτρική συνάρτηση**).

Σε μια περιοχή του χώρου, όπου είναι παρόντα πεδία E και B , η ική πυκνότητα ενέργειας u είναι

$$u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad B = \frac{E}{c} = \sqrt{\epsilon_0\mu_0} E \quad u = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} (\sqrt{\epsilon_0\mu_0} E)^2 = \epsilon_0 E^2$$

Γενικά, το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου είναι συνάρτηση της θέσης και του χρόνου, όπως στο ημιτονοειδές κύμα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως αυτά που έχουμε περιγράψει, είναι οδεύοντα κύματα που περιέχουν και μεταφέρουν ενέργεια από μια περιοχή σε άλλη. Μπορούμε να περιγράψουμε αυτήν τη μεταφορά ενέργειας U , μέσω της ενέργειας που μεταφέρεται **ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας εγκάρσιας διατομής ή της ορμής ανά μονάδα επιφάνειας**, για επιφάνεια κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχ. 32.17).

Αυτή η ποσότητα ονομάζεται **διάνυσμα Poynting**, την εισήγαγε ο Βρετανός φυσικός John Poynting (Τζον Πόιντινγκ, 1852-1914) και ισούται με

$$S = \frac{1}{A} \frac{dU}{dt} = \epsilon_0 c E^2 \quad (\text{στο κενό})$$

Διάνυσμα Poynting στο κενό

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B$$

Ηλεκτρικό πεδίο
Μαγνητικό πεδίο
Μαγνητική σταθερά

(32.28)

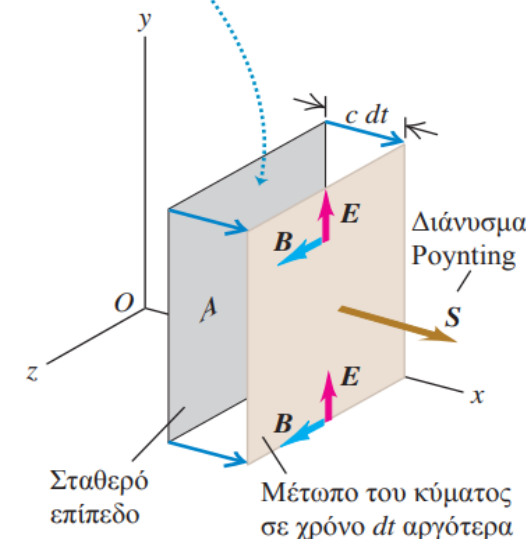
Το διάνυσμα S δείχνει στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχ. 32.18 επόμενη διαφάνεια). Αφού τα E και B είναι κάθετα μεταξύ τους, το μέτρο του S είναι $S = EB/\mu_0$

Η ολική ροή ενέργειας ανά μονάδα χρόνου (ισχύς, P) από κάθε κλειστή επιφάνεια είναι το ολοκλήρωμα του S πάνω στην επιφάνεια:

$$P = \oint S \cdot dA$$

32.17 Ένα μέτωπο κύματος σε χρόνο dt , αφού πέρασε διαμέσου του σταθερού επιπέδου με εμβαδόν A .

Σε χρόνο dt ο όγκος μεταξύ του σταθερού επιπέδου και του μετώπου του κύματος περιέχει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια $dU = uAc dt$.



32.18 Αυτοί οι ηλιακοί συλλέκτες οροφής είναι κεκλιμένοι, ώστε να έχουν τον Ήλιο σε κάθετη κατεύθυνση προς αυτούς – δηλαδή είναι κάθετοι προς το διάνυσμα Poynting των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από τον Ήλιο, έτσι ώστε να απορροφούν το μέγιστο ποσό ενέργειας.



Στα ημιτονοειδή κύματα καθώς επίσης και σε άλλα πιο σύνθετα κύματα, τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία σε κάθε σημείο μεταβάλλονται με τον χρόνο, οπότε και το διάνυσμα Poynting σε κάθε σημείο είναι επίσης συνάρτηση του χρόνου. Επειδή οι συχνότητες των τυπικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι πολύ υψηλές, η χρονική μεταβολή του διανύσματος Poynting είναι τόσο γρήγορη ώστε να είναι πιο πρόσφορο να κοιτάμε τη **μέση** του τιμή. Το μέτρο της χρονικής μέσης τιμής του S σε κάποιο σημείο ονομάζεται **ένταση** της ακτινοβολίας σε εκείνο το σημείο. Στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) η μονάδα έντασης είναι η ίδια με αυτήν του S , 1 W/m^2 .

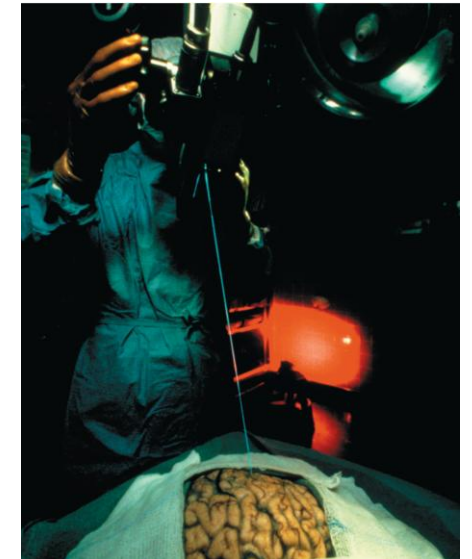
Ένταση ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό

$$I = S_{\text{av}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_{\text{max}}^2 \quad (32.29)$$

Πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου Πλάτος του μαγνητικού πεδίου Ηλεκτρική σταθερά

Μέτρο της μέσης τιμής του διανύσματος Poynting Μαγνητική σταθερά Ταχύτητα του φωτός στο κενό

BIO Εφαρμογή Χειρουργική Λέιζερ Τα λέιζερ χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ιατρική ως εξαιρετικά ακριβή, αναίμακτα «νυστέρια». Μπορούν να φθάσουν και να αφαιρέσουν όγκους με ελάχιστη βλάβη στους γειτονικούς υγιείς ιστούς, όπως στην επέμβαση σε εγκέφαλο που δείχνουμε εδώ. Η τυπική ισχύς εξόδου ενός λέιζερ είναι κάτω από τα 40 W , μικρότερη από εκείνη ενός συνηθισμένου λαμπτήρα. Ωστόσο, αυτή η ισχύς είναι συγκεντρωμένη σε μια κηλίδα με διάμετρο από $0,1 \text{ mm}$ μέχρι $2,0 \text{ mm}$, ώστε η ένταση του φωτός (που ισούται με τη χρονική μέση τιμή του διανύσματος Poynting) να μπορεί να φθάνει ακόμα και τα $5 \times 10^9 \text{ W/m}^2$.



ΠΡΟΣΟΧΗ Διάνυσμα Poynting Έναντι Έντασης Σε κάθε σημείο x , το μέτρο του διανύσματος Poynting αλλάζει με τον χρόνο. Επομένως, ο στιγμιαίος ρυθμός με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια ενός ημιτονοειδούς επιπέδου κύματος φθάνει σε μια επιφάνεια δεν είναι σταθερός. Αυτό μπορεί να νομίζετε ότι αντιβαίνει στην καθημερινή σας εμπειρία· το φως από τον Ήλιο, από έναν λαμπτήρα ή από το λέιζερ ενός σαρωτή στο μπακάλικο μοιάζει σταθερό και αμετάβλητο σε ισχύ. Στην πραγματικότητα, το διάνυσμα Poynting από αυτές τις πηγές **μεταβάλλεται** με τον χρόνο, αλλά η μεταβολή δεν είναι αισθητή, διότι η συχνότητα ταλάντωσης είναι υψηλή (περί τα $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ για ορατό φως). Αυτό που αισθάνεστε είναι ο **μέσος** ρυθμός με τον οποίο φθάνει στο μάτι σας η ενέργεια και γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούμε την ένταση (την μέση τιμή του S) για την περιγραφή της ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. |

Ροή ηλεκτρομαγνητικής ορμής και πίεση ακτινοβολίας

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και φέρουν *ορμή* p , με αντίστοιχη πυκνότητα ορμής (ορμή dp ανά όγκο dV), που έχει μέτρο

$$\frac{dp}{dV} = \frac{EB}{\mu_0 c^2} = \frac{S}{c^2} \quad (32.30)$$

Αυτή η ορμή είναι μια ιδιότητα του πεδίου· δεν σχετίζεται με τη μάζα κάποιου κινούμενου σωματιδίου με τη συνήθη έννοια.

Υπάρχει επίσης ένας αντίστοιχος ρυθμός ροής ορμής. Ο όγκος dV , που καταλαμβάνεται από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (ταχύτητα c), το οποίο διέρχεται διαμέσου μιας επιφάνειας A σε χρόνο dt , είναι $dV = Ac dt$.

$$\begin{aligned} \text{Ρυθμός ροής ηλεκτρομαγνητικής ορμής} &\rightarrow \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{S}{c} = \frac{EB}{\mu_0 c} \\ &\leftarrow \text{Μέτρο διανύσματος Poynting} \quad \leftarrow \text{Μέτρο ηλεκτρικού πεδίου} \\ &\leftarrow \text{Μέτρο μαγνητικού πεδίου} \quad \leftarrow \text{Ταχύτητα φωτός στο κενό} \\ &\leftarrow \text{Μαγνητική σταθερά} \\ &\leftarrow \text{Μεταφερόμενη ορμή ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου} \end{aligned} \quad (32.31)$$

Παίρνουμε τον μέσο ρυθμό ροής ορμής ανά μονάδα επιφάνειας αντικαθιστώντας το S στην Εξ. (32.31) με $S_{av} = I$.

Η ορμή είναι υπεύθυνη για την **πίεση της ακτινοβολίας**. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα απορροφάται πλήρως από μια επιφάνεια, η ορμή του κύματος επίσης μεταφέρεται στην επιφάνεια. Για να το απλοποιήσουμε θα θεωρήσουμε μια επιφάνεια κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης. Χρησιμοποιώντας τις έννοιες που αναπτύξαμε στο Κεφ. 8, βλέπουμε ότι ο ρυθμός dp/dt μεταφοράς ορμής στην απορροφούσα επιφάνεια ισούται με τη **δύναμη** στην επιφάνεια. Η μέση **δύναμη** ανά μονάδα επιφάνειας που οφείλεται στο κύμα ή η **πίεση ακτινοβολίας** p_{rad} είναι η μέση τιμή του dp/dt διαιρεμένη διά του εμβαδού A της απορροφούσας επιφάνειας.

$$p_{rad} = \frac{S_{av}}{c} = \frac{I}{c} \quad (32.32)$$

(Πίεση ακτινοβολίας, πλήρης απορρόφηση του κύματος)

$$p_{rad} = \frac{2S_{av}}{c} = \frac{2I}{c} \quad (32.33)$$

(Πίεση ακτινοβολίας, πλήρης ανάκλαση του κύματος)

Παραδείγματος χάρη, η τιμή του I (ή S_{av}) για το φως που έρχεται κατευθείαν από τον Ήλιο, πριν αυτό εισέλθει στην ατμόσφαιρα της Γης, είναι κατά προσέγγιση $1,4 \text{ W/m}^2$. Από την Εξ. (32.32), η αντίστοιχη μέση πίεση πάνω σε μια πλήρως απορροφούσα επιφάνεια είναι

$$p_{rad} = \frac{I}{c} = \frac{1,4 \times 10^3 \text{ W/m}^2}{3,0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 4,7 \times 10^{-6} \text{ Pa}$$

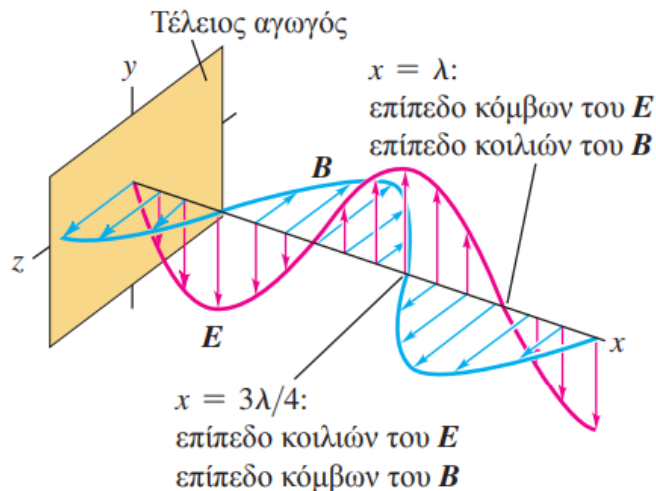
32.20 Στο κέντρο αυτού του διαστρικού νεφελώματος βρίσκεται μια ομάδα πολύ λαμπερών αστέρων, που ασκούν τρομερή πίεση ακτινοβολίας στον περιβάλλοντα χώρο. Υποβοηθούμενη από έναν «άνεμο» σωματιδίων, που προέχονται από τους αστέρες, η πίεση της ακτινοβολίας κατά τα προηγούμενα εκατομμύρια χρόνια έχει σκάψει μέσα στο νεφέλωμα μια φυσαλλίδα με διάμετρο 70 έτη φωτός.



ΣΤΑΣΙΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα **ανακλώνται** από την επιφάνεια ενός αγωγού (όπως ένα γυαλισμένο φύλλο μετάλλου) ή ενός διηλεκτρικού (όπως ένα φύλλο γυαλιού). Η επαλληλία ενός προσπίπτοντος κύματος και ενός ανακλώμενου σχηματίζει ένα **στάσιμο κύμα**. Η κατάσταση είναι ανάλογη με τα στάσιμα κύματα σε μια τεντωμένη χορδή, που συζητήσαμε στο Κεφ. 15. Ας υποθέσουμε ότι ένα φύλλο τέλειου αγωγού (μηδενική αντίσταση) τοποθετείται στο επίπεδο yz του Σχ. 32.22 και ένα γραμμικά πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται προς την αρνητική κατεύθυνση x , πέφτει πάνω του. Το προσπίπτον κύμα επάγει ταλαντούμενα ρεύματα στην επιφάνεια του αγωγού, τα οποία δημιουργούν ένα πρόσθετο ηλεκτρικό πεδίο. Το **ολικό** ηλεκτρικό πεδίο, που είναι το διανυσματικό άθροισμα αυτού του πεδίου και του προσπίπτοντος E , είναι μηδέν παντού στο εσωτερικό και στην επιφάνεια του αγωγού. Τα επαγόμενα ρεύματα στην επιφάνεια του αγωγού παράγουν επίσης ένα **ανακλώμενο** κύμα, που ταξιδεύει έξω από το επίπεδο στην κατεύθυνση $+x$. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, το ολικό ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων E του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος και ομοίως για το πεδίο B .

32.22 Αναπαράσταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ενός γραμμικά πολωμένου ηλεκτρομαγνητικού στάσιμου κύματος όταν $\omega t = 3\pi/4$ rad. Σε κάθε επίπεδο κάθετο στον άξονα x , το E είναι μέγιστο (κοιλία) όπου το B είναι μηδέν (κόμβος), και αντίστροφα. Καθώς περνά ο χρόνος, ο σχηματισμός δεν μετακινείται κατά μήκος του άξονα x · αντίθετα, σε κάθε σημείο τα διανύσματα E και B απλά ταλαντώνονται.



$$E_y(x, t) = E_{\max} [\cos(kx + \omega t) - \cos(kx - \omega t)]$$

$$B_z(x, t) = B_{\max} [-\cos(kx + \omega t) - \cos(kx - \omega t)]$$

$$E_y(x, t) = -2E_{\max} \sin kx \sin \omega t \quad (32.34)$$

$$B_z(x, t) = -2B_{\max} \cos kx \cos \omega t \quad (32.35)$$

Η Εξ. (32.34) είναι ανάλογη της Εξ. (15.28) για μια τεντωμένη χορδή

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots \quad (\text{επίπεδα κόμβων του } E) \quad (32.36)$$

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots \quad (\text{επίπεδα κόμβων του } B) \quad (32.37)$$

Σε κάθε σημείο οι ημιτονοειδείς διακυμάνσεις των δύο πεδίων είναι 90° εκτός φάσης.

Στάσιμα κύματα σε μια κοιλότητα

Ας θεωρήσουμε δύο παράλληλα αγωγίμα επίπεδα σε απόσταση L . Ένα στάσιμο κύμα μπορεί να υπάρχει μόνο όταν το δεύτερο επίπεδο τοποθετηθεί σε μία από τις θέσεις όπου $E(x, t) = 0$, δηλαδή το L πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $\lambda/2$. Τα μήκη κύματος που ικανοποιούν αυτήν τη συνθήκη είναι

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad \text{Οι αντίστοιχες συχνότητες είναι: } f_n = \frac{c}{\lambda_n} = n \frac{c}{2L} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (32.39)$$

Άρα, υπάρχει ένα σύνολο **κανονικών τρόπων ταλάντωσης**, ο καθένας με μια χαρακτηριστική συχνότητα, σχήμα κύματος και σύστημα κόμβων (Σχ. 32.23). Μετρώντας τις θέσεις των κόμβων, μπορούμε να μετρήσουμε το μήκος κύματος. Αν η συχνότητα είναι γνωστή, η ταχύτητα του κύματος μπορεί να προσδιοριστεί. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Χερτς τη δεκαετία του 1880 στις πρωτοποριακές του μελέτες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

32.23 Ένας τυπικός φούρνος μικροκυμάτων δημιουργεί ένα στάσιμο ηλεκτρομαγνητικό κύμα με $\lambda = 12,2 \text{ cm}$, ένα μήκος κύματος που απορροφάται ισχυρά από το νερό των τροφών. Επειδή το κύμα έχει κόμβους σε αποστάσεις $\lambda/2 = 6,1 \text{ cm}$ μεταξύ τους, οι τροφές πρέπει να περιστρέφονται κατά το μαγείρεμα. Διαφορετικά, το μέρος που βρίσκεται σε έναν κόμβο –όπου το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν– θα παραμείνει κρύο



Αγώγιμες επιφάνειες δεν είναι οι μόνοι ανακλαστήρες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ανακλάσεις λαμβάνουν επίσης χώρα και σε μια διεπαφή ανάμεσα σε δύο μονωτικά υλικά με διαφορετικές διηλεκτρικές ή μαγνητικές ιδιότητες.

